

CODE 134**HORMIGÓN DE CAL PARA LA RESTAURACIÓN DE LA IGLESIA DEL
ROSSELLÓ (LÉRIDA)****Rosell, Joan Ramon¹; Ramírez-Casas, Judith¹; Bedini, Sara¹; Sala, Miquel Àngel²**

1: Departamento de Tecnología de la Arquitectura, UPC
e-mail: joan.ramon.rosell@upc.edu.com

2: Arquitecto autor del proyecto; Departamento de Construcción, URV.

PALABRAS CLAVE: Restauración, hormigón de cal, cal hidráulica, aditivo reductor de agua, pigmentos.

RESUMEN

En enero de 2016, la torre del campanario de la Iglesia de Sant Pere, en el pueblo de Rosselló (a 10 km de Lleida) colapsó. Las causas del derrumbe, aún sin determinar, probablemente fueron debidas a la desestabilización de uno de los muros laterales del propio campanario.

La iglesia, construida en el siglo XVIII, es la única de la población y es urgente una restauración inmediata, que permita recobrar a los habitantes de la población su lugar de culto.

Los proyectistas encargados de la restauración decidieron ejecutarla con materiales compatibles a los originales, específicamente usando como conglomerante la cal. El proyecto de restauración no plantea la reproducción de la torre sino realizar una estructura que marque el hito de la antigua torre.

El presente estudio, por tanto, se centra en la investigación de un hormigón de cal hidráulica, y con unas prestaciones iniciales específicas:

- Resistencia a compresión a 90 días de 10 MPa;
- Reproducción del color similar al de la piedra original de los paramentos de fachada de la iglesia;
- Condiciones particulares de puesta en obra.

Se partió de la bibliografía existente y de materiales de proximidad, para desarrollar una campaña de estudio en el laboratorio.

Los resultados obtenidos satisfacen las prestaciones planteadas en un inicio y demuestran, en principio, la viabilidad de utilizar el hormigón de cal ensayado.

La obra se está realizando con excelentes resultados.

1. INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad, la cal ha desempeñado un papel fundamental como conglomerante en la edificación, pero la aparición de otros materiales con mejores y más rápidas prestaciones mecánicas, hizo reducir su uso hasta su desaparición como conglomerante para elementos con función estructural.

Hoy en día, este desplazamiento sigue siendo inevitable, sin embargo la compatibilidad de la cal con los materiales tradicionales originales de un extenso patrimonio edificado [1] y la tecnología desarrollada en los últimos tiempos, propicia que nos podamos replantear de nuevo el uso de la cal para la intervención en este patrimonio en forma de hormigón.[2] y [3].

De hecho, los hormigones de cal forman parte del patrimonio arquitectónico con o sin reacciones hidráulicas. En el mundo romano la adición de puzolanas (tierras de Pozzuoli, cerca de Nápoles) permitió las construcciones hidráulicas. Asimismo, la utilización de una puzolana artificial, como resulta ser la chamota (cerámica triturada), posibilitó los morteros y hormigones impermeables de los fondos de los canales de los acueductos, entre muchos otros.

Es innegable que hoy en día tenemos instalada en nuestras mentes una cierta “cultura” del hormigón (de cemento portland) que comporta entre otros que los programas de cálculo de estructuras asuman valores de módulos de Young para estos materiales y de adherencia hormigón-armadura, resistencias tipificadas, tiempos y tipos de curado, tiempos de desencofrados y de entrada en carga, etc. Esta “cultura” debe adaptarse a nuevos (o quizás muy viejos) paradigmas si se trata de hormigones de cal.

Seguidamente se expone el caso de la reconstrucción parcial de la torre del campanario de la iglesia del Rosselló, pequeño pueblo cercano a Lleida.

En enero de 2016, la torre del campanario de la Iglesia de Sant Pere colapsó. Las causas del derrumbe, aún sin determinar, probablemente fueron debidas a la desestabilización de uno de los muros laterales del propio campanario.

La iglesia, construida en el siglo XVIII, es la única de la población y es urgente una restauración inmediata, que permita recobrar a los habitantes de la población su lugar de culto.

Los proyectistas encargados de la restauración decidieron ejecutarla con materiales compatibles a los originales, específicamente usando como conglomerante la cal. El proyecto de restauración no plantea la reproducción de la torre sino realizar una estructura que marque el hito de la antigua torre.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es la formulación de un hormigón de cal hidráulica para la restauración del campanario de la iglesia de Rosselló (Lleida) y que como premisas se debe cumplir con las siguientes características: Resistencia a compresión de 10 MPa a 90 días, consistencia fluida y un color lo más similar posible a la piedra original que forma la mampostería de las fachadas de la iglesia.

La resistencia no es estrictamente necesaria para las sollicitaciones del caso concreto, pero se establece como objetivo pensando en otros usos posteriores.

3. METODOLOGIA

Este estudio se estructura en dos etapas: una primera etapa experimental, llevada a cabo en el Laboratorio de Materiales de la EPSEB, y la segunda, la puesta en obra del material en la iglesia.

Inicialmente, se decidió formular 3 hormigones de cal distintos. Un primer hormigón sin adiciones

puzolánicas (A), un segundo con sustitución de una parte de cal por microsilíce (B) y un tercer hormigón también con sustitución de cal por nano y microsilíce (C).

Dada la sensibilidad del comportamiento mecánico de estos hormigones respecto del contenido de agua de la dosificación, antes de la formulación definitiva a estudiar, se llevó a cabo un estudio de efectividad de unos aditivos reductores de agua.

Decididas las relaciones A/C y la cantidad y tipo de fluidificante para cada uno de los hormigones (A, B, C), se formularon 5 dosificaciones definitivas (A1, A3, B1, B2, C1).

Las probetas de 15x30 cm se ensayaron a compresión [4] a 28, 60, 90, 120 días y se determinaron las porosidades [5].

Paralelamente se llevó a cabo el correspondiente estudio de color para las dosificaciones con y sin puzolanas.

4. MATERIALES

Los materiales utilizados para la realización del hormigón han sido:

Conglomerante: Cal hidráulica NHL5 de la casa CESA de Saint Astier (Francia). Se trata de una cal hidráulica natural sin adiciones de cemento. Las fases hidráulicas son del tipo belítico con ausencia de aluminatos cálcicos.

Árido: Mezcla lavada de arena y grava de origen calcáreo producida por Arenes Bellpuig, (a menos de 30 km del pueblo de Rosselló) de referencia AG-B-0/20-R-C. De la mezcla se ha estudiado su curva granulométrica (Figura 1).

Aditivo reductor de agua: Superfluidificante en polvo a base de polycarboxilato fabricado y distribuido por Sika (*ViscoCrete 125 Powder*,).

Adiciones puzolánicas: microsilica 920E y nanosilica 999, ambas distribuidas por Elkem.

Pigmentos: diferentes pigmentos inorgánicos de óxido de hierro (distribuidos por Serra Ciments).

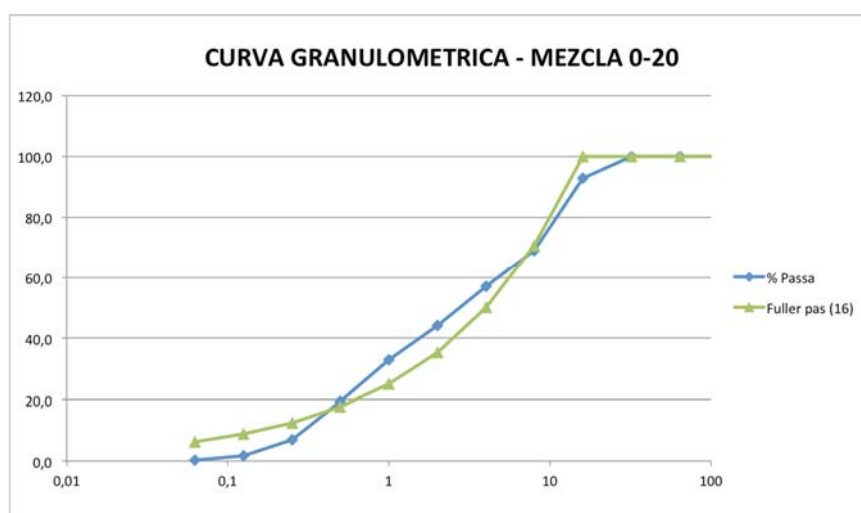


Figura 1. Curva granulométrica de la mezcla del árido utilizado.

5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

A partir de las tres dosificaciones A, B y C, la campaña experimental consiste en:

- estudio del aditivo reductor de agua (necesario para establecer la cantidad de agua óptima y de superfluidificante para cada dosificación);
- producción de probetas cilíndricas (15x30 cm), y ensayo de resistencia a compresión a diferentes edades (28, 60, 90, 120 días)
- Determinación de las porosidades.
- Estudio de color.

5.1. Estudio del aditivo reductor de agua

Antes de determinar las diferentes cantidades de aditivo reductor de agua para las diferentes dosificaciones, se ha estudiado su comportamiento al mezclarlo con los demás materiales. Se partió de tres tipos de aditivos: una melanina formaldehído, un lignosulfonato y un policarboxilato, y se estudió su efecto inicialmente en pastas puras (cal + agua + aditivo) hasta determinar una dosificación eficiente.

Seguidamente se escogió el más adecuado (policarboxilato) y se concretaron las dosificaciones para el conjunto de componentes del hormigón (cal + puzolana + agua + árido + aditivo)

La consistencia de las mezclas se ha determinado, en el primer caso, a través de la mesa de sacudidas [6] y, en el segundo, con el cono de Abrams [7].

5.2. Dosificaciones

Las dosificaciones definitivas, 5 en total, pueden resumirse como sigue.

Los valores de las relaciones agua/cal están entre 0,37 y 0,42. Se ha fijado la cantidad de cal en 450 kg por m³ de hormigón. La adición de las puzolanas se hace por sustitución 1/1 de cal.

Y las proporciones de aditivo reductor de agua no superan en ningún caso el 0,72% sobre el peso del conglomerante.

5.3. Estudio de color

Como premisa del proyecto se planteó que el hormigón a diseñar debería reproducir el color de la piedra del muro de mampostería de la torre del campanario original.

Para llegar a obtener el color deseado se hicieron mezclas con diferentes porcentajes de pigmentos, todos ellos de origen inorgánico de óxido de hierro.

Primero se hicieron las mezclas con las pastas y los pigmentos (Figura 2) y posteriormente se realizaron las pruebas añadiendo el árido para comprobar como cambiaba la tonalidad con dicha incorporación. En el caso de la mezclas con incorporación de microsílice las correcciones fueron más, dado el color gris de la propia puzolana.



Figura 2. Muestras de las pruebas de color de las diferentes dosificaciones.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se detallan los resultados obtenidos de resistencia a compresión y porosidad

Tabla 1: Resultados de resistencia a compresión.

	Edad (días)							
	28		60		90		120	
	Resistencia compresión (MPa)							
	\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S	\bar{X}	S
A1	10,3	0,3			14,0	0,2		
A3	9,2	0,2	10,7	0,6	15,0	0,4	14,5	0,3
B1			35,9	0,7			39,1	0,4
C1			19,3	0,3			21,7	

Los resultados de las porosidades, realizadas con muestras de las probetas con roturas a 28 días, oscilan entre el 21% i el 26%.

En cuanto a la resistencia, los resultados A1 y A3 corresponden a hormigones simplemente de NHL-5, sin adiciones puzolánicas. Los B1 y C1 contienen microsílice y la B1 también nanosílice.

Como puede observarse es relativamente sencillo obtener 10 MPa a 90 días. Para resistencias mayores a más cortas edades es necesario utilizar adiciones puzolánicas.

Las porosidades de los hormigones de cal (Hidráulica) serán siempre muy elevadas si las comparamos con las del cemento portland, dado que el consumo de agua en las reacciones de hidratación es mucho menor que en los de CP.

En la carbonatación de la portlandita no se consume agua, sino que se genera:



Cuando se utilizan puzolanas para formar CSH, las reacciones que fijan agua se producen diferidas en el tiempo.

Así pues, la mayor parte del agua de amasado debe necesariamente evaporarse de la matriz del hormigón, dejando una fina estructura capilar.

7. PUESTA EN OBRA DEL HORMIGÓN

Una vez obtenidos los resultados del estudio experimental de laboratorio, se pasó la información a la Dirección Facultativa para empezar a realizar pruebas en la obra y seguidamente continuar con la fabricación sistemática del hormigón correspondiente a los muros de la torre (Figura 3).

Lo realmente relevante de este estudio ha sido la experiencia en obra. A pesar de nuestras concretas indicaciones para la fabricación "in situ" del hormigón, la interpretación por parte del constructor fue errónea. Y los resultados obtenidos así lo corroboran (Tabla 2).

Tabla 2: Resultados de resistencia a compresión del hormigón de la obra.

	Edad (días)			
	10		28	
	Resistencia compresión (MPa)			
	\bar{X}	S	\bar{X}	S
"in situ" (1ª indicaciones)	2,6	0,1	3,7	0,2
"in situ" (2ª indicaciones, amasada 1)	4,3	0,2	9,0	1,5
"in situ" (2ª indicaciones, amasada 2)	4,15	0,3	9,2	0,1

En una segunda instancia se trasladó una balanza a la obra y los medios necesarios para medir cantidades de productos y se hizo suficiente hincapié en la diferencia de fabricar un hormigón de cemento portland y un hormigón de cal hidráulica.

Los resultados del control de calidad han mostrado como la dosificación diseñada en el laboratorio funciona también en obra.



Figura 3. Proyecto de alzado principal y sección de la parte de la torre del campanario.

8. CONCLUSIONES

Los hormigones planteados pueden fácilmente conseguir resistencias > 10 MPa a 90 días, sin especificaciones especiales, más que los contenidos de NHL-5 elevados y la utilización de los correspondientes aditivos reductores de agua.



Figura 4. Retrospectivas de los resultados del hormigón ejecutado en la obra

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] *Carta Internacional sobre la Conservación y la Restauración de Monumentos y de Conjuntos Histórico-Artísticos*, II Congreso Internacional de Arquitectos y Técnicos de Monumentos Históricos, Venecia 1964. Aprobada por ICOMOS en 1965.

[2] Ana L. Velosa y Paulo B. Cachim, Hydraulic–lime based concrete: Strength development using pozzolanic addition and different curing conditions. *Construction and Building materials*, Vol. 23 2107-2111 (2009);

[3] Miranda Lopez O., Estudio de micro- hormigones de cal hidráulica con puzolanas para la mejora de la resistencia mecánica, *Proyecto final de Master, UPC*, Barcelona, 2017.

[4] UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

[5] UNE-EN 12390-7:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 7: Densidad del hormigón endurecido.

[6] UNE-EN 1015-3:2000. Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).

[7] UNE 12350-2:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.